



Proyecto de I+D+i financiado por el
Consejo de Seguridad Nuclear

KARST Y RADÓN

Entidades investigadoras:

Universidad de Cantabria / Universidad de Málaga / Universitat Politècnica de València



Investigador principal: Luis Santiago Quindós Poncela

Autores:

U. CANTABRIA

Carlos Sainz Fernández

U. MÁLAGA

Sergio Cañete Hidalgo
Elisa Gordo Puertas

U. P. VALENCIA

Gumersindo Jesús Verdú Martí
Belén Jeanne Juste Vidal
Sebastián Martorell Alsina
Josefina Ortiz Moragón

Convocatoria: 2021

El presente informe recoge información relativa a cada uno de los objetivos que forman parte del Proyecto financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear (diciembre 2021 - diciembre 2024) y que se refieren a continuación.

INTRODUCCIÓN

En España, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha identificado las zonas con mayor riesgo de exposición al radón a partir de las medidas de radón en viviendas disponibles, del Mapa de Radiación Gamma Natural (MARNA), del Mapa litoestratigráfico y de permeabilidades de España. El cumplimiento de la normativa derivada de la Directiva 2013/59 proporcionará amplia información sobre los niveles de radón en las zonas identificadas como de mayor riesgo. No obstante, fuera de estas zonas, también se detectan concentraciones de radón que superan el nivel de referencia de 300 Bq/m^3 , aunque con una probabilidad mucho menor. Este proyecto pretendió estudiar en detalle uno de los factores geológicos que puede originar concentraciones elevadas de radón y que no se contempla en la actualidad en el mapa de radón: los sistemas kársticos. Esto contribuirá a un mejor conocimiento de la dinámica del radón en este tipo de sistemas y, por lo tanto, a mejorar el conocimiento sobre la exposición al radón en España.

Los objetivos del proyecto se enumeran a continuación:

OBJETIVO 1: Caracterización de las zonas kársticas elegidas desde el punto de vista radiológico-geológico-estructural

- 1. a.- Radiación gamma externa
- 1. b.- Espectrometría gamma de suelos
- 1. c.- Exhalación de gas radón de los suelos
- 1. d.- Permeabilidad
- 1. e. - Radón en suelos
- 1.f- Caracterización geológico-estructural
- 1.g.- Contenido de radón en agua (en abastecimientos de agua de consumo de la zona)

OBJETIVO 2: Medidas de gas radón en viviendas y puestos de trabajo en zonas kársticas

2.a Selección de localizaciones para las medidas

2. b.- Evolución temporal anual

2. c.- Intercomparación de métodos de medida de variables analizadas

OBJETIVO 3: Análisis de los datos y correlación entre variables medidas y modelización

La Universidad de Cantabria ha coordinado el Proyecto manteniendo la autonomía de cada una de las universidades participantes, por ello, para cada uno de los objetivos se muestra a continuación el trabajo ha sido desarrollado individualmente por cada organismo.

RESULTADOS POR OBJETIVO

OBJETIVO 1: CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS KÁRSTICAS ELEGIDAS DESDE EL PUNTO DE VISTA RADIOLÓGICO-GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL

Antes de describir cada objetivo individualmente y de mostrar los resultados obtenidos por cada universidad, se muestra una tabla resumen de todos los parámetros determinados en este apartado y el número de medidas fijadas inicialmente para este objetivo

NÚMERO DE MEDICIONES TOTALES SEGÚN OBJETIVO 1: Caracterización de las zonas kársticas elegidas desde el punto de vista radiológico-geológico-estructural				
OBJETIVO	Cantabria	Málaga	Castellón	TOTAL
1.a Radiación y externa	160	80	80	320
1.b Espectrometría y de suelos	160	80	80	320
1.c Exhalación de ^{222}Rn de los suelos	160	80	80	320
1.d Permeabilidad	160	80	80	320
1.e ^{222}Rn en suelos	160	80	80	320
1.f Caracterización geológico-estructural	-	-	-	-
1.g Contenido de ^{222}Rn en agua	70	40	40	150
	870	440	440	1750

Tabla 1

1.a.- Radiación gamma externa. Universidad de Cantabria

Una vez limitado el área de estudio en función del mapa geológico de la Comunidad de Cantabria, se seleccionaron 160 puntos para la toma de medidas. El equipo empleado para la medición ha sido un Exploranium Gr-135 de 256 canales calibrado en el Instituto de Técnicas Energéticas de la Universidad Politècnica de Catalunya.

Un resumen de los valores promedio, incertidumbres e intervalo se recoge en la Tabla 2.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Radiación gamma externa (nSv/h)	68,0	14,3	40,0	110,0

Tabla 2. Valores estadísticos

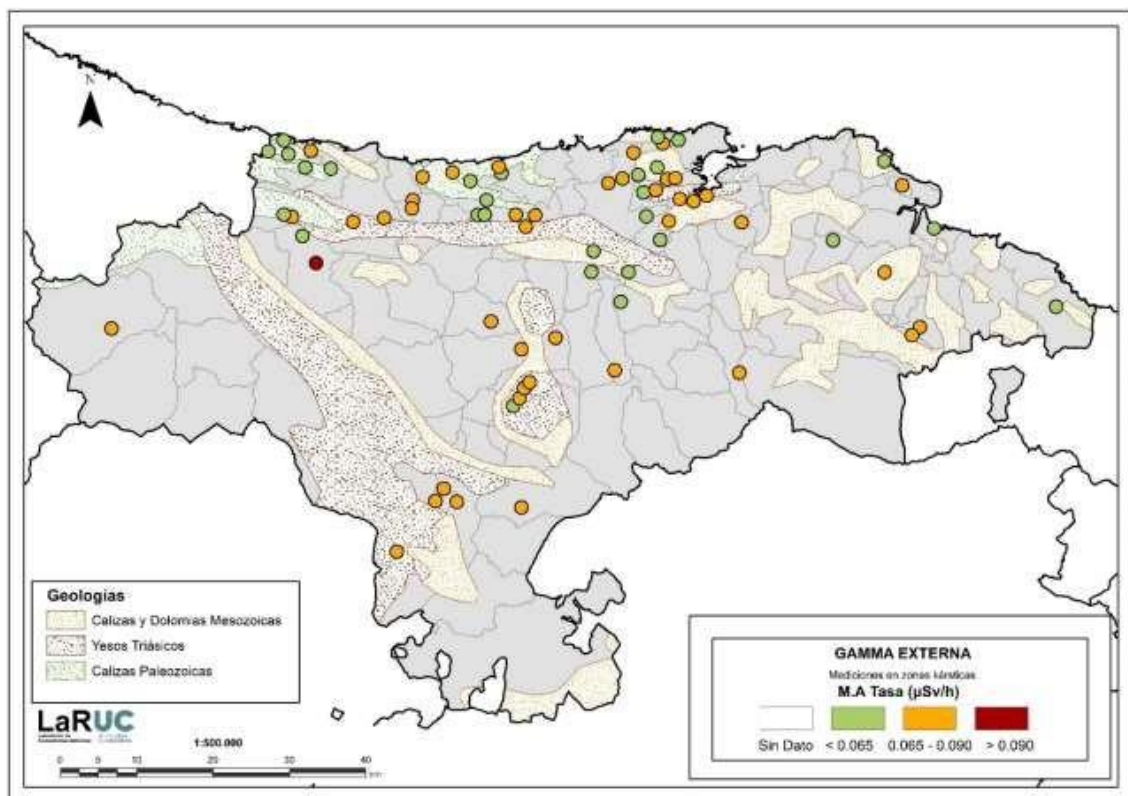


Figura 1. Puntos de muestreo

En relación al Figura 1 y al resto de mapas que se presentan en esta memoria, conviene señalar que todos los puntos tomados se encuentran en zonas kársticas. Aquellos que a simple vista parecieran estar localizados en otras áreas geológicas, se debe a que los polígonos kársticos en esas zonas son de una menor superficie y no se aprecian a esa escala.

1.a.- Radiación gamma externa. Universidad Politécnica de Valencia

Se han tomado 97 medidas en cada una de las celdas kársticas que componen la provincia de Castellón. En la imagen del Mapa 2 se pueden observar los puntos exactos donde se midió en cada celda. Un resumen de los valores promedio, desviación e intervalo se recoge en la Tabla 3.

The map displays the Ebro Delta region, with the Ebro River flowing from the north towards the Mediterranean Sea. The study area is divided into a grid of sampling points, labeled CS1 through CS72. The map includes labels for various towns and regions, such as Tortosa, L'Amplia, and La Rapta. The Ebro River is shown in blue, and the Mediterranean Sea is shown in dark blue. The land area is shown in shades of brown and green, indicating different types of vegetation and terrain. The map also shows the location of the Ebro Delta, which is a large area of wetlands and marshes. The sampling points are distributed throughout the delta, with a higher density in the central and eastern parts. The map is oriented with North at the top.

Figura 2. Relación puntos de muestreo y celdas

Parámetro	Media	Desviación estándar	Límite superior (Media+2σ)
Radiación gamma externa (nSv/h)	150	4	240

Tabla 3. Análisis estadístico de los resultados de radiación gamma externa

1.a.- Radiación gamma externa. Universidad de Málaga

Una vez limitado el área de estudio en función del mapa geológico de la provincia de Málaga, se seleccionaron 80 puntos para la toma de medidas para un total de 33 celdas de referencia. Las medidas de tasa de dosis equivalente ambiental (H^*10) se realizaron con un contador proporcional de la marca Berthold, modelo Umo LB123 con una sonda de radiación en geometría 4π LB1236, también se empleó como instrumento complementario una cámara ionización marca Fluke Biomedical, modelo 451P. Ambos equipos se encuentran verificados y calibrados (Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes del CIEMAT), según el programa de verificación y calibración de la IRA-0940 de la Universidad de Málaga. Un resumen de los valores promedio, incertidumbres e intervalo se recoge en la Tabla 4. La Figura 3 nos muestra los puntos de muestreo.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Radiación gamma externa (nSv/h)	128	24	87	191

Tabla 4. Valores estadísticos

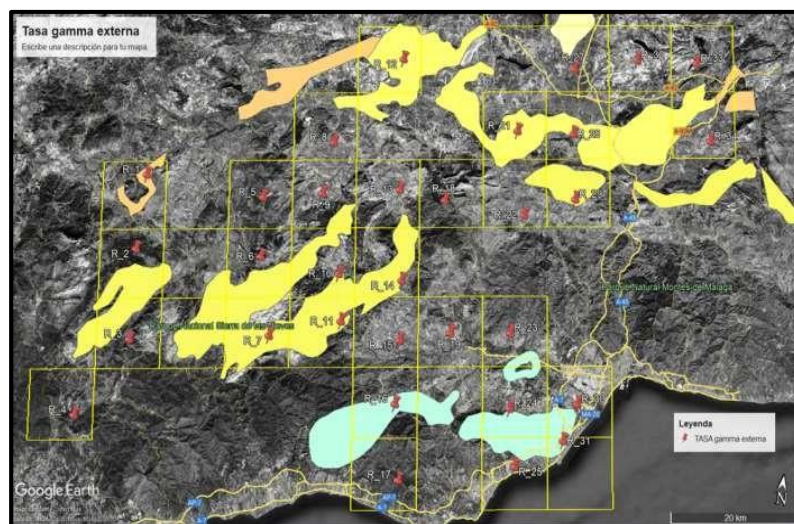


Figura 3. Puntos de muestreo

1.b.- Espectrometría gamma de suelos. Universidad de Cantabria

La técnica de espectrometría gamma es un procedimiento empleado frecuentemente para la medida de materiales que potencialmente podrían ser fuente de radón en los

edificios. En general, es una técnica muy desarrollada y utilizada para el análisis de elementos radiactivos en muy diferentes tipos de muestras

Las muestras se analizaron en un equipo de espectrometría gamma con detector de semiconductor de germanio intrínseco HPGe marca Mirion modelo BE3820, refrigerado por nitrógeno líquido. Debido a la utilización de este equipo en múltiples ensayos e intercomparaciones y al contar el LaRUC con la acreditación UNE-EN ISO/IEC 17025 para esta técnica, la calidad de las medidas y la correcta calibración del equipo está garantizada.

La Tabla 5 recoge los valores de U-238, Ra-226, Th-232, K-40 y Cs-137 en las muestras de suelos recogidas en los mismos 160 puntos en los que se llevó a cabo la medida de la radiación gamma externa.

Parámetro Espectrometría gamma suelos (Bq/kg)	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
U-238	25,3	9,1	6,3	48,5
Ra-226	31,7	11,3	4,0	84,0
Th-232	32,9	10,4	3,8	58,0
K-40	306,9	176,0	39,2	1302,0
Cs-137	4,8	2,9	1,0	12,5

Tabla 5. Valores estadísticos

1.b.- Espectrometría gamma de suelos. Universidad Politécnica de Valencia

La siguiente tabla recoge los valores de actividad de isótopos naturales de Ra-226, Th- 232 y K-40, y el isótopo artificial Cs-137 en muestras de suelos recogidas en los mismos puntos en los que se llevó a cabo la medida de la radiación gamma externa. El procedimiento seguido es el UPV/LRA/AC/G-3 de “Determinación de emisores gamma en suelos, sedimentos, materiales de construcción y minerales molturados de densidades comprendidas entre 0.7 y 2 gcm-3 y silicato de circonio de 3.5 gcm-3, mediante detector de semiconductor de Ge(HP)” acreditado según la UNE-EN ISO 17025 por la Agencia Nacional de Acreditación (ENAC) (nº 620/LE1050). En este procedimiento las actividades de Ra-226 y Th-232 se determinan a partir de sus descendientes Pb-214 y Ac- 228, respectivamente. Las incertidumbres presentadas han sido calculadas con un coeficiente de cobertura de k=2, y los límites de detección según la ISO 11929.

Los valores de la media de actividad para los distintos isótopos se muestran en la Tabla 6

Parámetro Espectrometría gamma suelos (Bq/kg)	Media	Desviación estándar	Límite superior (Media+2σ)
Ra-226	28.27	10.19	48.65
Th-232	33.55	12.28	58.11
K-40	493.78	191.76	877.30
Cs-137	5.95	7.11	20.17

Tabla 6. Análisis estadísticos de los resultados

1.b.- Espectrometría gamma de suelos. Universidad de Málaga

Las mediciones radiométricas se realizaron mediante espectrometría gamma de bajo fondo con un detector de germanio de tipo coaxial (Canberra Industries Inc., EE. UU.), con una eficiencia relativa del 20% que fue calibrado utilizando un patrón de referencia certificado con 8 radionucleidos emisores gamma abarcando, así, un rango de energías de 59,54 a 1836,05 KeV.

Cada muestra se midió durante 172.000 s y el análisis de espectros se realizó con el software de espectrometría Genie2K versión 2.0 (Canberra Industries Inc., EE. UU.)

La resolución del detector estaba en el rango de 1,7-1,8 keV a 1,33 MeV para ⁶⁰Co.

Las incertidumbres reportadas reflejan errores propagados que surgen del error de conteo correspondiente a 2σ, las calibraciones de eficiencia del detector y las correcciones de fondo.

Para validar los métodos, nuestro laboratorio participa habitualmente en ejercicios interlaboratorios para medir radionucleidos emisores de gamma, en diferentes tipos de muestras, organizadas por la Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA), el Centro Común de Investigación (JRC) y el Consejo Seguridad Nuclear (CSN).

La Tabla 7 recoge los valores de U-238, Ra-226, Th-232, K-40 y Cs-137 en las muestras de suelos recogidas en los mismos 80 puntos en los que se llevó a cabo la medida de la radiación gamma externa. Por otro lado, también se presenta una tabla con los valores más significativos del conjunto de datos.

Parámetro Espectrometría gamma suelos (Bq/kg)	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
U-238	21,8	8,5	7,9	40,0
Ra-226	25,4	12,6	7,8	69,8
Th-232	29,0	7,4	10,4	46,9
K-40	467,7	150,1	154,6	789,2
Cs-137	2,7	1,1	0,6	5,8

Tabla 7. Valores estadísticos

1.c.- Exhalación de radón de suelos. Universidad de Cantabria

La exhalación de radón es la liberación de gas radón al aire atmosférico y su medida resulta de vital importancia ya que unos valores altos de exhalación suponen un mayor riesgo de exposición a la radiación para los seres vivos.

La exhalación de radón depende de varios factores. Inicialmente tiene que haber emanación y transporte de radón desde las capas más profundas del suelo para que finalmente el gas exhale hacia la superficie. A parte de esto, el nivel de exhalación está muy influenciado por el contenido en humedad del suelo, la velocidad del viento, las variaciones diurnas y la presión. Con respecto a esta última, se ha observado que en periodos de bajas presiones atmosféricas la concentración de radón en el interior de las viviendas incrementa.

Por lo tanto, la medida de la exhalación de radón del suelo en el entorno kárstico nos va a proporcionar información sobre el riesgo en dichas zonas de que haya gas radón en las viviendas.

Para este proyecto, se marcó como objetivo la medida de la exhalación en 160 puntos de Cantabria. En total se cuenta con un número de 615 medidas, ya que se decidió hacer más de una medida por cada punto.

El ensayo se llevó a cabo empleando cartuchos de carbón activo, colocándose 5 por cada punto y durante una exposición de 24 horas. Tras su recogida, se analizaron en laboratorio a través de un detector de yoduro de sodio dopado con talio. El procedimiento seguido está acreditado por ENAC y forma parte del conjunto de actividades desarrolladas por LARUC en dicho marco.

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos:

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Exhalación (Bq/m ² .h)	82,3	69,7	40,0	290,0

Tabla 8. Valores estadísticos

1.c.- Exhalación de radón de suelos. Universidad Politécnica de Valencia

Se han llevado a cabo medidas de la exhalación de radón en 97 puntos, los mismos que se eligieron para la radiación gamma externa y resto de análisis de suelos.

El equipo de medida del ISIRYM son electretes con la cámara H. La cámara H presenta una ventana de difusión grande que dispone de un collar de acero inoxidable que facilita la inserción de la cámara en la tierra evitando la dispersión del gas contenido medido. Se han realizado medidas de 5-6 horas en cada punto de muestreo.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Límite superior (Media+2σ)
Exhalación (Bq/m ² .h)	21.26	26.45	74.15

Tabla 9. Análisis estadísticos de los resultados

1.c.- Exhalación de radón de suelos. Universidad de Málaga

Para este proyecto, se marcó como objetivo la medida de la exhalación en 80 puntos de la zona de interés de la provincia de Málaga. En total se cuenta con un número de 240 medidas, ya que se decidió hacer tres réplicas por cada punto, mostrándose los valores promedios para cada referencia.

El ensayo se llevó a cabo empleando cartuchos de carbón activo colocados sobre unos soportes de metacrilatos que actúan de cámara de exhalación, colocándose 3 por cada punto y durante una exposición de 24 horas. Tras su recogida, se analizaron en laboratorio a través de un detector de yoduro de sodio dopado con talio. En la Tabla 10 se muestran todos los resultados obtenidos:

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Exhalación (Bq/m ² .h)	17,9	13,9	5,1	68,9

Tabla 10. Valores estadísticos

1.d.- Permeabilidad de suelos. Universidad de Cantabria

Otro de los factores que influyen en el transporte de radón en un suelo es la permeabilidad. Para determinar este parámetro se empleó un equipo diseñado por el grupo RADON v.o.s. El dispositivo va conectado al suelo a través de una sonda y el valor de permeabilidad se obtiene a partir del tiempo que tarda el equipo en succionar un volumen de dos litros de aire del suelo. Este equipo basa su medida en la aplicación de la ley de Darcy y fue desarrollado hace más de quince años, consolidándose en la actualidad como el método más empleado para la determinación de la permeabilidad de un suelo.

La Tabla 11 recoge un resumen de los 160 datos registrados.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Permeabilidad Valor k (m ²)	1.10 ⁻¹²	2.10 ⁻¹²	5.10 ⁻¹⁴	1.10 ⁻¹¹

Tabla 11. Valores estadísticos

1.d.- Permeabilidad de suelos. Universidad Politécnica de Valencia

Se han llevado a cabo medidas de permeabilidad de radón en 97 puntos, los mismos que se eligieron para el resto de medidas en suelos. El dispositivo empleado para la medida de la permeabilidad del suelo al gas radón es el equipo del grupo checo de RADON v.o.s y su protocolo de medida. La Tabla 12 recoge los resultados.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar
Permeabilidad (m ²)	1.91E-12	3.34E-12

Tabla 12. Análisis estadístico de los resultados de permeabilidad

1.d.- Permeabilidad de suelos. Universidad de Málaga

En este apartado se muestra la tabla de los 80 datos registrados, cumpliendo así el objetivo marcado inicialmente. Con la misma metodología que las anteriores, la Tabla 13 recoge los resultados.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Permeabilidad Valor k (m ²)	2,63 ^{E-12}	2,64 ^{E-12}	1,00 ^{E-13}	9,00 ^{E-12}

Tabla 13. Valores estadísticos

1.e.- Radón en suelos. Universidad de Cantabria

El suelo constituye la principal fuente de radón en las viviendas, por ello, el conocimiento de la concentración de radón en suelo puede ser un indicador de la presencia de radón en interiores y es un parámetro de vital importancia para el presente estudio.

Para la medida de radón en suelo se utilizó un dispositivo diseñado también por el grupo RADON v.o.s que consiste en una barra metálica y un tubo para extraer una muestra de aire del suelo. Al introducir en el suelo la barra junto con una punta a una profundidad de 80 cm, se crea un “gap” del que obtendremos la muestra de aire en la que mediremos la concentración de radón. La muestra se puede medir en campo posteriormente mediante cámaras de ionización y un electrómetro, obteniendo así la concentración de radón en ese punto. El laboratorio LaRUC viene participando de manera habitual en el Ejercicio de Intercomparación que se realiza en Praga de medida de radon en suelo desde 2005 con resultados muy favorables.

La tabla 14 recoge los resultados de las 246 medidas realizadas en los distintos puntos de Cantabria.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Contenido Rn en suelo (kBq/m ³)	44,9	76,5	0,5	465,0

Tabla 14. Valores estadísticos

1.e.- Radón en suelos. Universidad Politécnica de Valencia

Para medir concentración de gas radón a diferentes profundidades del suelo (hasta 1 metro), el Instituto ISIRYM cuenta con la sonda de gas de acero inoxidable conectada al monitor RAD7 (Soil Gas Probe Manual. 2015). Este equipo permite determinar la emanación del suelo de forma rápida (alrededor de 30 minutos) y precisa (Figura 4)..La Tabla 15 recoge los resultados.

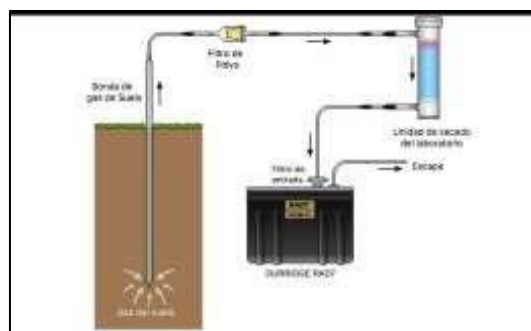


Figura 4. Medida de radón en suelos

Celda	Nºmedida	Fecha toma	Localidad	Coordenadas GPS	Concentración de radón en suelo (Bq/m3)	Incertidumbre (Bq/m3) k=2
1	2	14/03/24	Villores	40°40'45.2"N 0°12'15.3"W	1657.50	565.00
3	4	13/03/24	La Mata de Morella	40°37'18.6"N 0°15'56.4"W	768.75	405.00
8	10	13/03/24	Portell de Morella	40°32'55.7"N 0°15'08.9"W	830.25	430.00
9	11	18/04/24	Campello	40°32'57.0"N 0°07'28.0"W	521.42	322.50
17	22	21/02/24	Tirig	40°25'07.9"N 0°05'26.5"E	1747.50	557.50
19	25	19/04/24	Cervera del Maestre	40°28'03.4"N 0°18'10.7"E	298.50	262.50
20	26	17/04/24	Vinaròs	40°30'50.2"N 0°25'29.4"E	246.75	92.00
26	34	17/04/24	SªMagdalena de Pulpis	40°20'59.9"N 0°18'21.8"E	164.25	96.75
	35	17/04/24	Peñíscola	40°22'33.8"N 0°23'04.4"E	5175.00	157.50
34	45	31/01/24	Alcalá de Chivert	40°16'29.1"N 0°13'56.9"E	667.64	357.69
38	51	24/01/24	Lucena d el Cid	40°07'46.4"N 0°16'08.5"W	334.50	272.50
50	64	17/01/24	Benicàssim	40°04'41.4"N 0°01'53.3"E	571.25	334.55
55	71	24/11/23	Villamalur	39°58'05.2"N 0°23'25.8"W	363.00	312.50
	84	24/11/23	Chóvar	39°50'32.6"N 0°19'35.7"W	349.75	322.50
69	92	20/02/24	Vall d'Uixó	39°47'55.7"N 0°14'14.9"W	536.00	322.50

Tabla 15

1.e.- Radón en suelos. Universidad de Málaga

La Tabla 16 recoge los resultados de las medidas realizadas:

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Contenido Rn en suelo (kBq/m ³)	3,53	3,37	0,45	16,80

Tabla 16. Valores estadísticos

1.f.- Caracterización geológica estructural. Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Valencia y Universidad de Málaga

Aparecía reflejado en la solicitud del Proyecto. Estudios más detallados realizados por el Departamento de Geología de la Universidad de Cantabria han confirmado lo expresado en los mapas que se presentaron en la Memoria del Proyecto y localizado zonas de extensión más pequeña que también han sido incluidas en las campañas de medidas de las tres universidades.

1.g.- Radón en agua. Universidad de Cantabria

Con el objetivo de obtener una información más completa sobre el radón en zonas kársticas, se ha estudiado también el contenido de radón en agua. Aunque no es la principal fuente responsable de la concentración de radón en las viviendas, el contenido en radón del agua de consumo en algunas ocasiones puede aportar información interesante sobre los niveles de este gas en las áreas que son objeto de estudio.

Para su determinación se ha empleado la técnica de centelleo líquido con un equipo Triathler 425-034 que permite detectar las emisiones alfa y beta por las interacciones con un líquido centelleador.

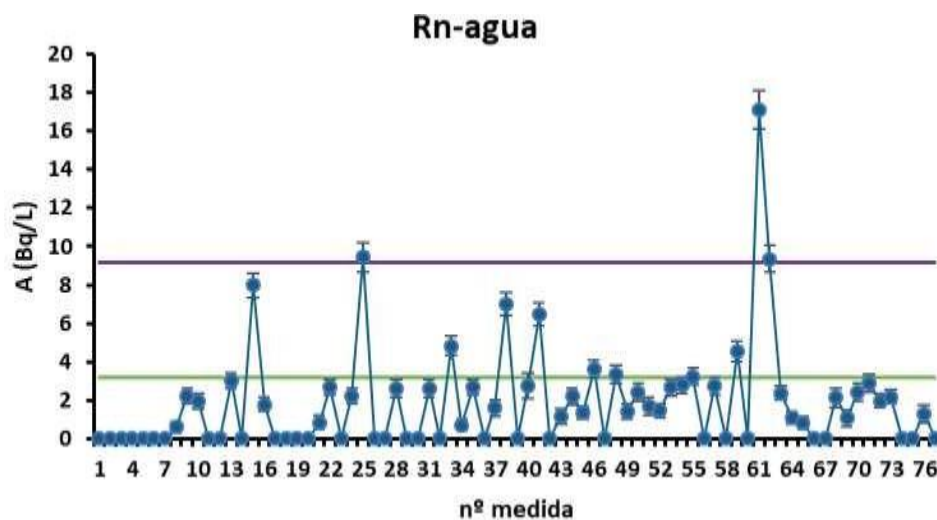
El número de medidas realizadas es 70, siendo este el objetivo planteado al inicio del proyecto. Los resultados obtenidos tras los análisis se muestran a continuación.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Contenido Rn222 en agua (Bq/l)	7,2	26,5	1,4	224,5

Tabla 17. Valores estadísticos

1.g.- Radón en agua. Universidad Politécnica de Valencia

La actividad de radón en muestras de aguas se ha determinado mediante centelleo líquido siguiendo el procedimiento UPV/LRA/AC/Rn-1 del LRA-UPV. El equipo de medida empleado es el espectrómetro de centelleo líquido de ultra bajo fondo Quantulus 1220 (PerkinElmer) y el protocolo de medida utilizado es el preestablecido para emisiones beta de baja energía (3H, low energy beta). En total, se han tomado y medido 77 muestras de diferentes localidades. Los resultados obtenidos se



presentan en la Figura 5.

Figura 5. Gráfico del valor promedio de actividad (línea verde), el límite máximo de actividad (línea morada) y los valores de actividad obtenidos de cada punto de muestreo.

1.g.- Radón en agua. Universidad de Málaga

La aplicación de centelleo líquido para la determinación de radón en agua evita las etapas de separación como la emanación y la difusión y, en consecuencia, también las fuentes de errores alineadas con la preparación de la muestra [Passo y Floeckner 1989]; [Prichard et al. 1992]; [Prichard y Gesell 1997].

El radón en el agua se midió después de una extracción previa en un cóctel de centelleo orgánico inmiscible en agua como MaxiLight+. Este último método aplica el hecho de que el coeficiente de distribución del radón como gas entre disolventes orgánicos como el tolueno y el agua supera un valor de 15. Además, la mejor discriminación electrónica de α /pulso β en los cócteles orgánicos reduce las interferencias de los efectos de la radiación β y la luminiscencia y, por lo tanto,

mejora el límite inferior de detección de manera integral. En el caso de las muestras de agua con alto contenido de sal, el uso de cócteles seguros que contienen DIN dificulta la separación de fases después de la etapa de extracción y, en ocasiones, permite una centrífuga.

La preparación de la muestra con el cóctel de centelleo se realizó directamente en el sitio de muestreo en ausencia de contacto con el aire con el fin de evitar la emanación de radón durante el muestreo.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Contenido Rn222 en agua (Bq/l)	6,63	2,95	3,40	14,20

Tabla 18. Valores estadísticos

OBJETIVO 2: CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS KÁRSTICAS ELEGIDAS DESDE EL PUNTO DE VISTA RADIOLÓGICO-GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL

2.a.- Selección de localizaciones para las medidas. Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Valencia y Universidad de Málaga

La medida de radón en interiores es otro parámetro fundamental a la hora de evaluar la influencia de la geología en los niveles de este gas.

Sobre las áreas kársticas de cada una de las tres zonas a estudiar presentadas en la Memoria de solicitud, se han elegido, siguiendo criterios específicos, los puntos de medida en los pueblos más adecuados y que presentaban las condiciones más favorables para la realización del trabajo.

Universidad de Cantabria

En cuanto a la Universidad de Cantabria, para la determinación de este parámetro se emplearon detectores pasivos CR-39 que se colocaron en cada punto seleccionado durante un periodo de exposición de tres meses. Tras su recogida, se revelaron y se midieron empleando un equipo Radosys y siguiendo el ensayo acreditado en el LaRUC por la norma UNE-EN ISO/IEC 17025.

En Cantabria se marcó como objetivo la realización de medidas en un total de 150 puntos, abarcando las tres geologías kársticas presentes en la comunidad: calizas paleozoicas, calizas y dolomías mesozoicas y yesos triásicos. Finalmente, se han realizado 258 medidas, cumpliendo así ampliamente el objetivo programado para el proyecto. Las concentraciones obtenidas tras el análisis y revelado de cada uno de los detectores aparecen en las siguientes tablas expresadas en Bq/m³. La Tabla 19 recoge los resultados.

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	% medidas > 300 Bq/m ³
Contenido Rn en aire (Bq/m ³)	121,8	256,2	10,0	2090,0	6,5

Tabla 19. Valores estadísticos

Universidad Politécnica de Valencia

La determinación de la exposición a radón en aire de los detectores a colocar por la UPV se ha realizado mediante el empleo de detectores electretes de largo término con cámaras L (E-PERM)(Figura 6). La Tabla 20 recoge resumen de resultados.



Figura 6: Electretes de largo término

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	% medidas > 300 Bq/m ³
Contenido Rn en aire (Bq/m ³)	113	93	26	415	9,6

Tabla 20. Valores estadísticos

Universidad de Málaga

Se ha empleado, de forma general, el uso de detectores pasivos CR-39 que se colocaron en cada punto seleccionado durante un periodo de exposición de tres meses y, posteriormente, fueron remitidos al laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria donde se revelaron y se midieron empleando un

equipo Radosys y siguiendo el ensayo acreditado en el LaRUC por la norma UNE-EN ISO/IEC 17025.

En Málaga se marcó como objetivo la realización de medidas en un total de 120 puntos, abarcando las tres geologías kársticas presentes en la zona elegida: calizas y dolomías mesozoicas, calizas tabulares, y en el núcleo de población sobre los yesos triásicos.

Los resultados aparecen recogidos en la Tabla 21

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	% medidas > 300 Bq/m ³
Contenido Rn en aire (Bq/m ³)	101	103	29	869	4

Tabla 21. Valores estadísticos

2.b.- Evolución temporal anual. Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Valencia y Universidad de Málaga

Universidad de Cantabria-Universidad de Málaga-Universidad de Valencia

En puntos seleccionados de las tres zonas, se determinaron aquellos en los que llevar a cabo la evolución temporal, escogiendo tanto viviendas como puestos de trabajo.

En general hemos detectado un aumento significativo, en las tres situaciones, de las concentraciones de radón en aire durante el segundo semestre respecto al primero, asumimos que debido a cambios climatológicos principalmente.

2.c.- Intercomparación de métodos de medida de variables analizadas. Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Valencia Universidad de Málaga

Una vez concedido el Proyecto por el CSN, se llevó a cabo una primera reunión presencial de coordinación en las instalaciones del Laboratorio de Radiación Natural, localizado en las instalaciones de ENUSA en Saelices el Chico (Salamanca). Aprovechando la reunión se llevó a cabo un primer ejercicio de intercomparación

utilizando dichas instalaciones para la medida de gas radón, radiación gamma externa empleando los dos “greens”, certificados por el CIEMAT y que proporcionan tasas de exposición de 100 y 1000 nGy/h. Igualmente se llevaron a cabo medidas utilizando los diferentes métodos empleados por las tres universidades. Por falta de equipo, en alguna de las universidades no se pudieron realizar medidas conjuntas de radón a 0,8 m de profundidad ni la permeabilidad y exhalación de radón.

Durante el periodo de desarrollo del Proyecto se han realizado dos importantes intercomparaciones, una de radón en agua y otra de medida de radón y radiación gamma externa. En ambas participaron las tres universidades con resultados muy satisfactorios.

OBJETIVO 3: ANÁLISIS DE LOS DATOS Y CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES MEDIDAS Y MODELIZACIÓN

En cada uno de los apartados referidos en el Informe se puede observar las variaciones encontradas entre las tres localizaciones estudiadas. En el caso de la Comunidad de Cantabria se ha podido llevar a cabo un estudio específico-modelización, que compara zonas kársticas y no kársticas dado que disponemos de un número de medidas muy elevado, aspecto que no ha podido ser desarrollado en la zona de Castellón y Málaga por carecer de medidas en zonas no kársticas.

Por el interés del estudio realizado en Cantabria pasamos a comentar los resultados obtenidos ya que los mismos pueden ser contrastados en otras situaciones similares tanto en nuestro país como en otras zonas de Europa.

Comparativa zonas kársticas y no kársticas

Para comenzar con el análisis de los datos se muestran tablas con los valores promedio para cada parámetro estudiado y se comparan los datos obtenidos en las zonas kársticas (en cada una de las tres geologías kársticas presentes en Cantabria) con datos de zonas no kársticas resultantes de otros proyectos en los que ha trabajado el LaRUC

Leyenda:

1001-Calizas Paleozoicas

2002-Calizas y Dolomías Mesozoicas y Paleógenas Tectonizadas

5004-Yesos Triásicos, a menudo en cantidades importantes de arcillas, carbonatos y otras sales

GAMMA EXTERNA Tasa ($\mu\text{Sv/h}$)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MEDICIONES	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	0.068	0.01	0.066	0.040	0.068	0.110	160	TOTAL	0.051	33
1001	0.066	0.01	0.065	0.040	0.067	0.106	52%			
2002	0.066	0.02	0.064	0.040	0.065	0.101	28%			
5004	0.075	0.01	0.074	0.045	0.073	0.110	20%			

Tabla 22

En la Tabla 22 la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es de 0.068 $\mu\text{Sv/h}$, valor superior a los 0.051 $\mu\text{Sv/h}$ obtenidos en las áreas no kársticas. La geología Yesos Triásicos (5004) supera ese valor promedio, obteniéndose en esta área una M.A de 0.075 $\mu\text{Sv/h}$ con el 20% de las mediciones realizadas en esta geología

GAMMA SUELOS-238U (Bq/kg)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MEDICIONES	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	25.3	9.2	23.4	6.3	25.1	48.5	160	TOTAL	15.7	33
1001	25.9	9.7	23.7	6.3	26.3	47.0	52%			
2002	24.1	9.1	22.3	8.0	23.5	48.5	28%			
5004	25.7	7.8	24.3	8.8	25.5	41.4	20%			

Tabla 23

En la tabla 23 la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es de 25.3 Bq/kg, valor superior a los 15.7 Bq/kg obtenidos en las áreas no kársticas. Las geologías Calizas Paleozoicas (1001) y Yesos Triásicos (5004) superan ese valor promedio, obteniéndose 25.9 Bq/kg con el 52% de las mediciones realizadas en la geología Caliza Paleozoica y 25.7 Bq/kg con el 20% de las mediciones realizadas en la geología Yesos Triásicos.

GAMMA SUELOS- 226Ra (Bq/kg)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MEDICIONES	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	31.7	11.4	29.8	4.0	30.9	84.0	160	TOTAL	26.5	33
1001	32.3	11.3	30.1	4.0	21.8	74.9	52%			
2002	28.5	8.3	27.2	13.4	26.1	45.6	28%			
5004	34.8	14.2	32.8	20.0	31.6	84.0	20%			

Tabla 24

En la Tabla 24 la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es de 31.7 Bq/kg, valor superior a los 26.5 Bq/kg obtenidos en las áreas no kársticas. Las geologías Calizas Paleozoicas (1001) y Yesos Triásicos (5004) superan ese valor promedio, obteniéndose 34.8 Bq/kg con el 20% de las mediciones realizadas en la geología Yesos Triásicos y 32.3 Bq/kg con el 52% de las mediciones realizadas en la geología Caliza Paleozoica.

GAMMA SUELOS- 232Th (Bq/kg)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MEDICIONES	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	32.9	10.4	31.0	3.8	32.2	58.0	160	TOTAL	43.7	33
1001	33.0	10.9	30.8	3.8	32.4	56.0	52%			
2002	31.6	11.6	29.5	7.5	29.6	58.0	28%			
5004	34.4	7.0	33.7	18.1	33.6	53.5	20%			

Tabla 25

En la Tabla 25 la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es de 32.9 Bq/kg, valor inferior a los 43.7 Bq/kg obtenidos en las áreas no kársticas. Las geologías Calizas Paleozoicas (1001) y Yesos Triásicos (5004) superan ese valor promedio, obteniéndose 31.4 Bq/kg con el 20% de las mediciones realizadas en la geología Yesos Triásicos y 33.0 Bq/kg con el 52% de las mediciones realizadas en la geología Caliza Paleozoica.

GAMMA SUELOS-40K (Bq/kg)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MED	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	306.9	176.0	265.6	39.2	262.2	1302.0	160	TOTAL	473.7	33
1001	275.6	105.4	255.7	46.4	248.0	559.0	55%			
2002	253.6	135.7	200.5	39.2	201.4	707.2	30%			
5004	487.7	244.2	453.3	168.0	480.5	1320.0	15%			

Tabla 26

En la Tabla 26, la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es de 306.9 Bq/kg, valor inferior a los 473.7 Bq/kg obtenidos en las áreas no kársticas. La geología Yesos Triásicos supera ese valor, obteniéndose 487.7 Bq/kg con el 15% de las mediciones realizadas.

GAMMA SUELOS-137Cs (Bq/kg)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MEDICIONES	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	4.8	2.9	3.9	1.0	4.2	12.5	160	TOTAL	5.6	33
1001	4.8	2.7	4.0	1.0	4.2	12.5	55%			
2002	6.0	3.0	5.0	1.1	6.1	11.6	30%			
5004	3.3	2.7	2.6	1.5	2.0	12.5	15%			

Tabla 27

En la Tabla 27 la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es de 4.8 Bq/kg, valor inferior a 5.6 Bq/kg obtenidos en las áreas no kársticas. La geología Calizas y Dolomías supera ese valor, obteniéndose 6.0 Bq/kg con el 30 % de las mediciones realizadas.

EXHALACIÓN DE RADÓN (Bq/m2.h)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MEDICIONES	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	82	69.7	62	40	40	290	615	TOTAL	42	15
1001	83	70.4	63	40	40	282	52%			
2002	86	72.2	65	40	40	282	29%			
5004	73	64.9	56	40	40	290	19%			

Tabla 28

En la Tabla 28 la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es de 82 Bq/m².h, valor superior a los 42 Bq/m².h obtenidos en las áreas no kársticas. Todas las geologías de estudio superan ese valor, La geología Calizas y Dolomías (2002) es la que presenta los valores más elevados (86 Bq/m².h), seguida por las Calizas Paleozoicas (83 Bq/m².h) y Yesos Triásicos (73 Bq/m².h)

PERMEABILIDAD Suelos (valor de k (m2)) Grado de Permeabilidad										
VALOR 1 Baja(<4.10-13m2) VALOR 2 Media (4.10-13m2 a 4.10-12m2) VALOR 3 Alta(4.10-12m2)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MEDICIONES	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	1.53	0.7	1.40	1	1	3	160	TOTAL	2.34	119
1001	1.42	0.6	1.33	1	1	3	46%			
2002	1.67	0.7	1.53	1	2	3	25%			
5004	1.59	0.8	1.43	1	1	3	29%			

Tabla 29

En la Tabla 29 la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es del orden de magnitud de entre <4.10⁻¹³m² y 4.10⁻¹³m² a 4.10⁻¹²m² (permeabilidad media- baja). La geología que presenta una permeabilidad más elevada es la correspondiente a las calizas y dolomías (2002)

RADÓN EN SUELOS Concentración (kBq/m3)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MEDICIONES	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	45	76.4	6	0	9	465	246	TOTAL	22	153
1001	38	64.0	6	1	7	465	51%			
2002	44	79.7	5	1	1	392	29%			
5004	67	96.3	9	0	16	356	20%			

Tabla 30

En la Tabla 30 la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es de 45 kBq/m³, valor superior a los 22 kBq/m³ obtenidos en las áreas no kársticas. La geología Yesos Triásicos (5004) supera ese valor promedio, obteniéndose en esta área una M.A de 67 kBq/m³ con el 20% de las mediciones realizadas en esta geología.

RADÓN EN AGUAS Concentración (Bq/l)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MEDICIONES	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	7.2	26.5	3.64	1.40	3.44	224.46	70	TOTAL	-	0
1001	3.60	2.2	2.99	1.40	3.14	9.620	47%			
2002	13.90	46.0	4.48	1.99	3.91	224.46	33%			
5004	15.96	37.4	5.95	1.75	4.00	152.00	20%			

Tabla 31

En la Tabla 31 la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es de 7.2 Bq/l no teniendo valor comparativo con las áreas no kársticas. La geología Yesos Triásicos (5004) supera ese valor promedio, obteniéndose en esta área una concentración de 15.96 Bq/l. Una segunda geología, la correspondiente a Calizas y Dolomías también supera ese valor, obteniéndose una media aritmética de 13.90 Bq/l.

RADÓN EN AIRE Concentración (Bq/m³)										
GEOLOGIA	M.A	DS MA	MG	MIN	MEDIANA	MAX	Nº MEDICIONES	GEOLOGIA NO KARSTICA	M.A	Nº MED
TOTAL	122	256.2	59	10	52	2090	258	TOTAL	78	300
1001	142	306.0	63	10	54	2090	57%			
2002	78	95.2	56	10	54	482	11%			
5004	88	119.5	53	10	47	703	32%			

Tabla 32

En la Tabla 32 la media aritmética obtenida del total de las mediciones realizadas en el área kárstica es de 122 Bq/m³, valor superior a los 78 Bq/m³ obtenidos en las áreas no kársticas. La geología Calizas Paleozoicas (1001) supera ese valor promedio, obteniéndose en esta área una M.A de 142 Bq/m³ con el 54% de las mediciones realizadas en esta geología.

RESUMEN GLOBAL DE LOS RESULTADOS

Con el objetivo de resumir todos los datos recabados para este proyecto y centrarnos en las áreas kársticas, se presenta una la Tabla 33 donde se encuentran conjuntamente los promedios (M.A) obtenidos en todos los parámetros estudiados y para cada una de las universidades participantes.

	ZONA KÁRSTICA		
	PROMEDIO (M.A)		
VARIABLE	UC	UPV	UMA
RADÓN EN AIRE			
Concentración (Bq/m3)	122	113	101
RADÓN EN SUELOS			
Concentración (KBq/m3)	45.0	0.9	3.5
GAMMA EXTERNA			
Tasa (µSv/h)	0.068	0.15	0.12
GAMMA SUELOS			
238U (Bq/kg)	25.3	-	21.8
GAMMA SUELOS			
226Ra (Bq/kg)	31.7	28.2	25.4
GAMMA SUELOS			
232Th (Bq/kg)	32.9	33.5	29.0
GAMMA SUELOS			
40K (Bq/kg)	306.9	493.7	467.7
GAMMA SUELOS			
137Cs (Bq/kg)	4.8	5.9	2.7
EXHALACIÓN DE RADÓN			
(Bq/m2.h)	82	21	18
RADÓN EN AGUAS			
Concentración (Bq/l)	7.2	3.2	6.6
PERMEABILIDAD			
Permeabilidad Suelos (valor de k (m2))			
Grado de Permeabilidad			
VALOR 1 Baja(<4.10-13m2)	1.5	2.0	2.0
VALOR 2 Media (4.10-13m2 a 4.10-12m2)			
VALOR 3 Alta(4.10-12m2)			

Tabla 33: Resumen global de resultados

CONCLUSIONES

Tras todo el trabajo desarrollado durante este proyecto y a partir de los resultados obtenidos, podemos establecer las siguientes conclusiones:

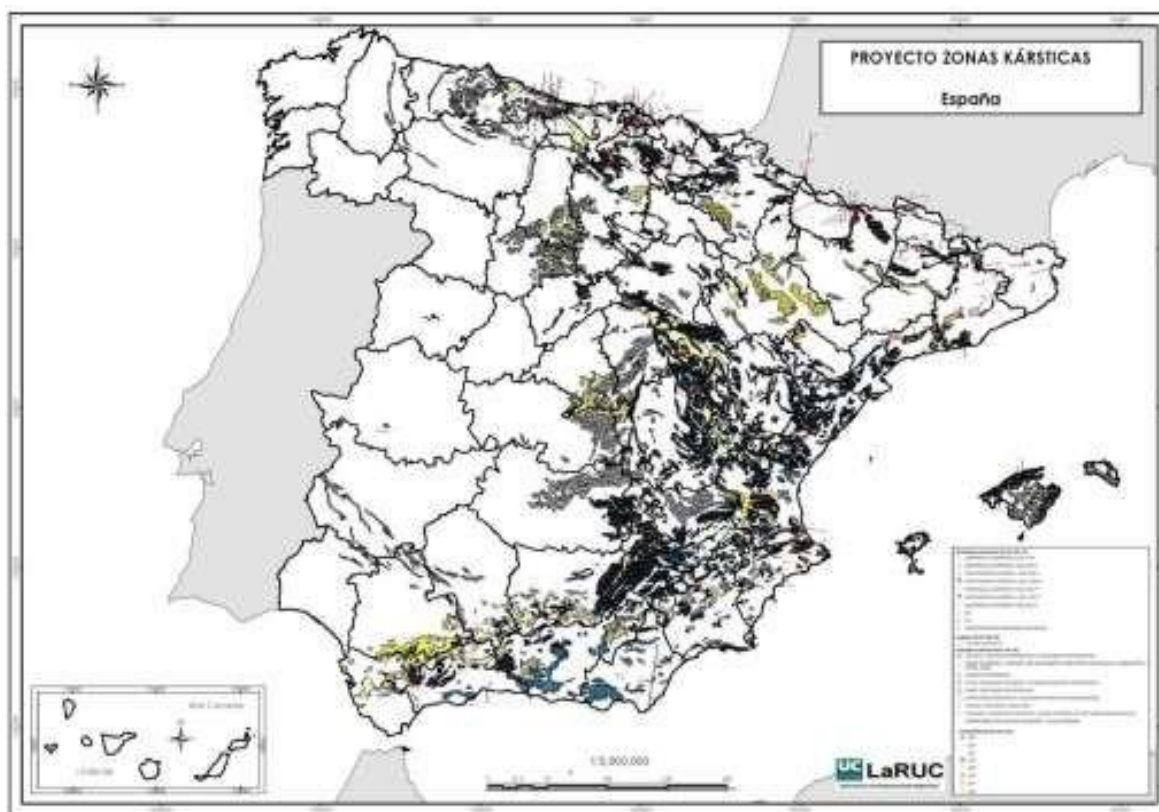
-Por primera vez se dispone de una base de datos de caracterización de zonas kársticas desde un punto de vista integral, seleccionando zonas de Cantabria, Málaga y Castellón. Para ello se han realizado medidas de radiación gamma externa, concentración de elementos radiactivos en los suelos, contenido de radón en el interior del suelo, permeabilidad, radón en aire y radón en aguas de fuentes y consumo. Un total de más de 3000 medidas se han llevado a cabo.

-Se ha puesto de manifiesto para cada uno de los parámetros analizados la diferencia sustancial que presentan si los comparamos con los que aparecen recogidos en el mapa potencial de radón.

-El Proyecto aporta resultados sobre parámetros que no han sido incluidos en el mencionado mapa potencial de radón y que muestran el interés de llevar a cabo este tipo de estudios a nivel local.

-Los resultados encontrados para la concentración de radón en viviendas muestran que el porcentaje de las mismas que superan los 300 Bq/m³ es del mismo orden que el recogido a nivel nacional y no muy distinto del correspondiente a zonas enmarcadas en el mapa de potencial de radón, razón por la que sería conveniente ampliar campañas de medida a zonas kársticas como las marcadas en el mapa que se indica (Figura 7).

Figura 7: Zonas kársticas en España



Referencias

- CSN (2000). *Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural. Colección informes técnicos 5.2000*. CSN, Madrid.
- CSN (2014). *Estudio de la problemática existente en la determinación del índice de actividad alfa total en aguas potables. Colección Informes Técnicos 37.2014*. CSN, Madrid.
- Directiva 2013/59/Euratom, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. Diario Oficial de la Unión Europea, de 17 de enero de 2014.
- European Commission (1977) *Radiation Protection 88, Recommendation for the implementation of title VII of the European BSS Directiva concerning significant increase in exposure due to natural radioactive sources*. European Commission, Luxembourg.
- IAEA (1996) *Safety Series 115. International Basic Safety Standards for the protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources*. IAEA, Vienna.
- Quindós, L.S., Fernández, P.L., Ródenas, C., Gómez-Arozamena, J. & Arteché, J. (2004). Conversion factors for external gamma dose derived from natural radionuclides in soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 71, 139-145.
- Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. BOE, de 21 de diciembre de 2022.